

(論文)

電熱併給ハイブリッド型太陽光発電システム

桑原英明*・三宅俊也(工博)*・林 浩一**・山村利和**・高橋利彰**

*技術開発本部・機械研究所 **都市環境・エンジニアリングカンパニー・高砂機器工場

Photovoltaic-Thermal Hybrid Systems

Hideaki Kuwabara・Dr. Toshiya Miyake・Koichi Hayashi・Toshikazu Yamamura・Toshiaki Takahashi

In order to improve the cost performance of conventional photovoltaic systems, a photovoltaic/thermal hybrid system that uses thermal energy as an auxiliary heat source for heating water in homes was developed. The developed system collects thermal energy through attachment part fixing solar panel to a roof-top. In field tests, the system was able to provide 20MJ energy with a 3kW photovoltaic system on a clear day.

まえがき = 現在普及している太陽エネルギーを利用するシステムとして、太陽光線を電気に直接変換して利用する太陽光発電システムと太陽熱を集熱して利用する太陽熱温水器(ソーラーシステム)の2通りが一般に知られている。従来、両者はそれぞれ独立したシステムとして住宅などに設置されてきた。このうち太陽光発電における太陽エネルギーの利用率は高々10数%程度にとどまり、残りの約80%超のエネルギーは利用されことなく大気中に熱として捨てられている¹⁾。

筆者らは、太陽光発電システムの経済性を向上させるため、従来利用されていなかった熱を回収し、補助熱源として利用する太陽光発電と太陽熱回収を同時におこなうシステムについてこれまで検討してきた¹⁾²⁾。そこで、現在急速に普及している個別住宅向け建材一体型太陽電池に着目し、従来の建材一体型太陽光発電システムの特徴を損ねることなく、住宅の熱需要に見合った量の熱回収をおこなう電熱併給型ハイブリッドシステムを考案し試作した。

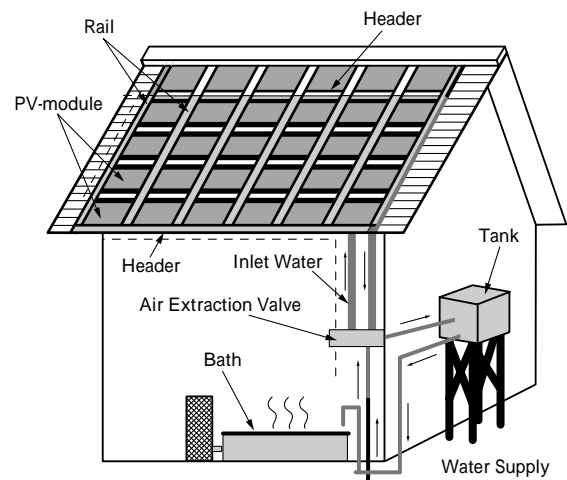
本システムでは、太陽電池を屋根に固定する型材の中に伝熱管を収納していることが第一の特徴となっている。これにより水漏れなどの不具合にも容易に対処できるとともに、屋根としての美観性を損ねることなく省スペースで発電と熱回収を同時に実現している。

本報告では、発電量1kWおよび3kWの発電システムに熱回収システムを組み込んだ装置のフィールド試験結果および本システムの集熱特性、年間集熱量予測について説明する。

1. システム概要

1.1 本システムの概要

本電熱併給システムでは、太陽熱エネルギーを個別住宅向け補助熱源として利用することを目的とし、第1図に示すようなシステム構成を想定している。本システムでは、循環ポンプをなくすため水道の元圧を利用して水道水を熱回収部に送水する。水道水は、屋根上に配置された各伝熱管を1パスで流れ、温水となって一度地上のタンクに貯湯される。この温水は、必要に応じ浴槽に供給



第1図 システム概念図

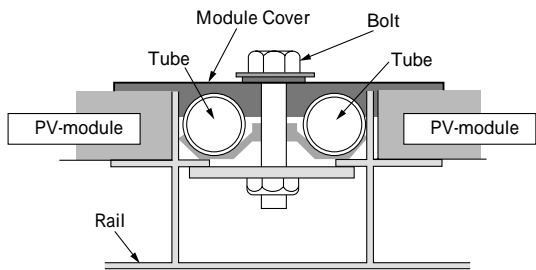
Fig. 1 Conceptual figure of proposed system

されるシステムとなっている。当然のことながら太陽エネルギーは安定した熱源ではないため、他の太陽熱利用システムと同様に、本システムにおいても主熱源として他の熱源を装備する必要がある。

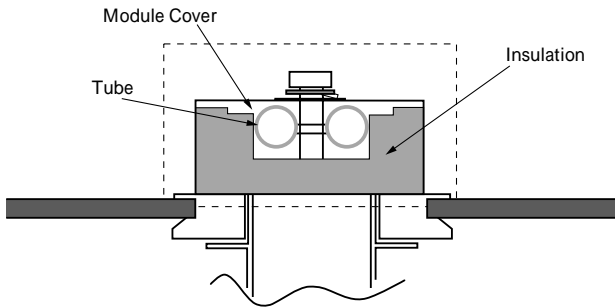
本研究では、住宅向けシステムであることを考慮し、システムの回収熱エネルギー量を一日あたり20MJとした。これは、お風呂一杯程度(240l)の水を20℃昇温させるために必要な熱量である。

1.2 本システムでの集熱構造

本システムでは1)省スペース性、2)メンテナンス性、3)長期信頼性、4)美観性という観点から、太陽電池を屋根に固定する型材の中に伝熱管を収納する方法を採用している。第2図にその断面構造を示す。一般的に建材一体型の太陽電池は、屋根に固定された型材と押さえカバー(モジュールカバー)に挟まれるように固定される。本システムでは第2図のとおり、押さえカバーの裏面に伝熱管が固定されることで、従来の太陽光発電システムの美観性を損なうことはない。同時に、型材およびフレームのフィン効果によりカバーに入射する太陽熱だけでなく従来利用されていなかった太陽電池設置面で発生する熱を熱源として利用できるため、熱回収装置の設置面積の省スペース化が可能となっている。さらに、型材内の



第2図 集熱部断面構造 (1)
Fig. 2 Cross-sectional structure of thermal collector (1)



第3図 集熱部断面構造 (2)
Fig. 3 Cross-sectional structure of thermal collector for control experiment (2)

伝熱管にはチタン製直管を使用しており、水抜け性も良好で冬場の凍結防止と、長期信頼性がえられる。

また、本システムでは、水道の元圧を直接利用することで循環ポンプの動力を不要とし、1パスでの加熱を実現している。はからずも水漏れが生じた時には、水が型材内を流れて軒から排水されるため、屋根を構成する野地板を濡らすこともなく、メンテナンスが必要な場合にも太陽電池を外すことなくメンテナンスが可能である。

2. 伝熱評価試験

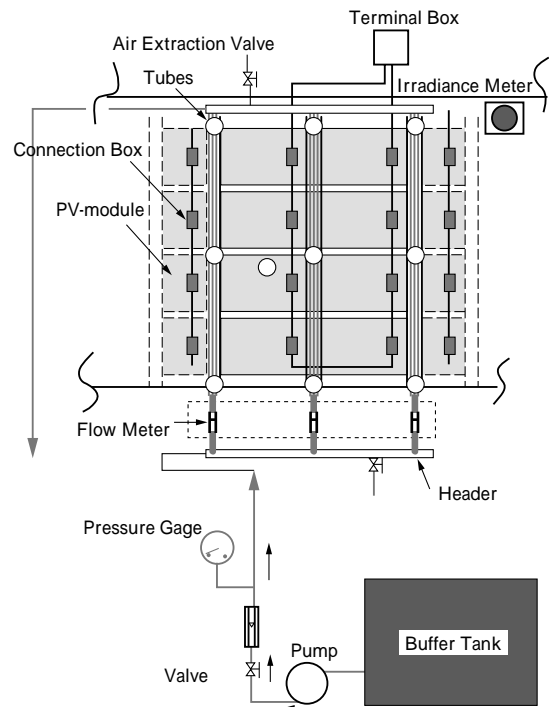
2.1 伝熱試験装置

本フィールド試験では主に集熱特性を調べた。まず、本システムの熱回収量を予測する伝熱モデルを作成するため、第2図と第3図に示した異なる断面構造を持つ熱回収システムを模擬屋根上に設置し、対照実験をおこなった。

第2図では、カバー表面からの熱回収と太陽電池からの熱回収両方がおこなわれ、第3図ではカバー表面からの熱回収のみとなり、両者の熱回収量を比較することで太陽電池設置面から回収される熱の寄与度を定量化することができる。

次に、システムが設置されている環境条件をもとに熱回収量を予測するため、日射計、風速計、熱電対などをもちいて各種測定をおこなった。

本システムの水道水のフローは、第4図に示すように水道水を一度バッファタンクに貯留し、ポンプで流量計を経て各伝熱管に一定量を給水する。また、各伝熱管に取付けられた流量計と熱電対から伝熱管1本ごとの通過水量と入口・出口水温を測定するとともに、カバー表面の水流方向の温度分布と太陽電池の温度も測定した。水道水は、写真1中央部の矢印で示すように伝熱管の軒方



第4図 システムフロー
Fig. 4 Figure of experimental system flow

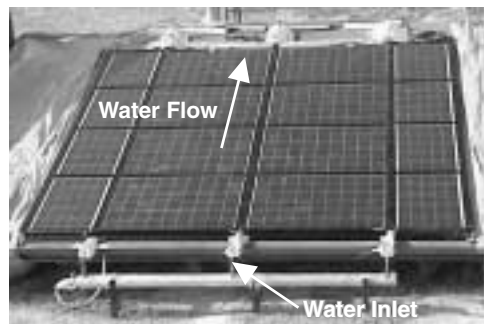


写真1 実験装置外観
Photo 1 Appearance of experimental device

第1表 実験装置構成機器の仕様
Table 1 Specification of components of experimental device

Components	Specification
Number of Modules	8 + 8 Dummies
Rated Output of Generated Power	1kW
Circulation Heat -medium	Tap Water
Buffer Tank	Maximum 250/
Rate of Water Flows	0.15/ /min
Heat Exchanger Tubes	
Number of Tubes	2
Length of Single Tube	3.3m
Diameter	12.8mm(Wall Thickness : 0.7mm)
Module Cover	
Size (Width × Length)	75mm × 3.3m
Surface Condition	Black Paint

向(写真1下部)から、棟方向(写真1上部)に流れる。

第1表に本実験で使用した装置の構成部品を示す。

2.2 伝熱試験条件

本実験での各実験条件と測定項目は第2表に示すとおりである。設置角度は、屋根上に設置することと水の流れ具合をみるため、傾斜角 15° の緩やかな傾斜角度とした。また、水量は型材1列あたり 0.15/ /min とし、晴天日の 10 : 00 ~ 14 : 00 までの4時間で期間は5 ~ 8月ま

第2表 実験条件と測定項目

Table 2 Test conditions and measurement items

Test Condition and Measurement Items through out a Year	Conditions (to one column of extrusions)
Rate of Circulating Water Flow	0.15l/min/2 tubes (Corresponds to 252l in 4 hours of operating time)
Operating Time	10:00 ~ 14:00 (4 Hours/day)
Installation Condition	
Direction	South
Tilt Angle	15°
Site	Kobe City
Total Installation Area	11.5m ² /1.5kW Photovoltaic System
Area of Module Cover A	0.25m ²
Area of Module Cover B	0.25m ²
Measurement Period	May through August, 2000
Measurement Items	Experimental Condition
Solar Radiation Intensity	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)
Ambient Temperature	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)
Wind Velocity	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)
Water Temperature	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)
Temperature of Individual Members	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)

での夏季に測定をおこなった。カバーについては、太陽光発電システム本来の外観を損ねない程度の幅である75mmとした。

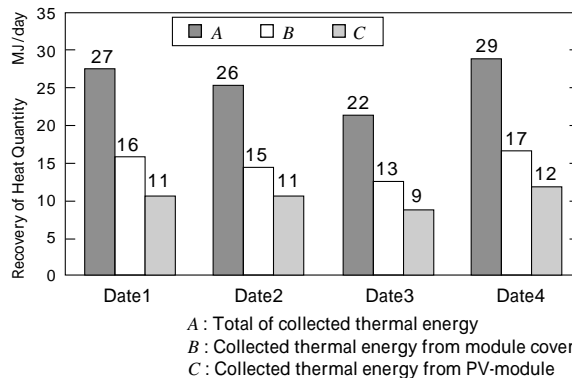
2.3 伝熱試験結果

本システムにおける対照実験結果を第5図に示す。第5図では3kWの太陽光発電システムを想定し、測定された一日の集熱量に対して7倍(型材7列分)したものを縦軸に示した。また、横軸には測定された各日のデータを並べた。各日のデータについて太陽電池設置面とカバーから回収される熱量をA、カバーのみから直接回収される熱量をB、太陽電池設置面のみから回収される熱量をCで表している。

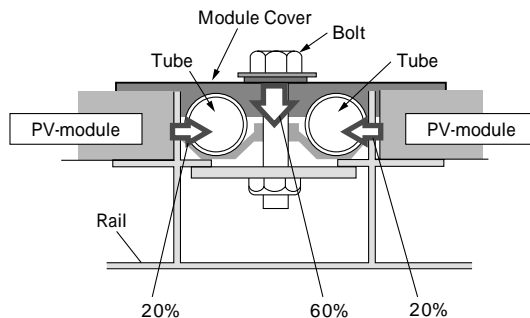
これらの結果より、太陽電池設置面からも熱回収する構造(第2図)においては、第6図の集熱概念図に示すように全集熱量に占めるカバー表面から直接回収される熱量は約60%であり、太陽電池設置面から間接的に回収される熱量は約40%であることがわかった。この結果から、本システムのような太陽電池間に伝熱管を分散配置することでえられるフィン効果を定量化できた。また、カバーと太陽電池から伝熱管への熱伝導を個別に定量化できたため、両者の総括熱伝達率を組込んだモデルの作成が可能となった。

次に、晴天日における環境条件と熱回収量の関係を第7図に示す。第7図では型材1列あたりの一日の回収熱量を縦軸に、各測定日の測定時間中の平均風速を横軸に示した。データにばらつきがあるものの、風速の増大とともに回収熱量が低下する傾向がみられる。これは本試験装置のように受光面が直接外気にさらされている場合、外気との接触面で生じる抜熱の影響が大きいことを示している。この結果から本システムの熱回収量予測は、風速を変数として風環境を考慮したものである。

ここで、熱回収量結果と測定日における日射量測定結果、熱回収装置による設置面積の増加分を基に算出した

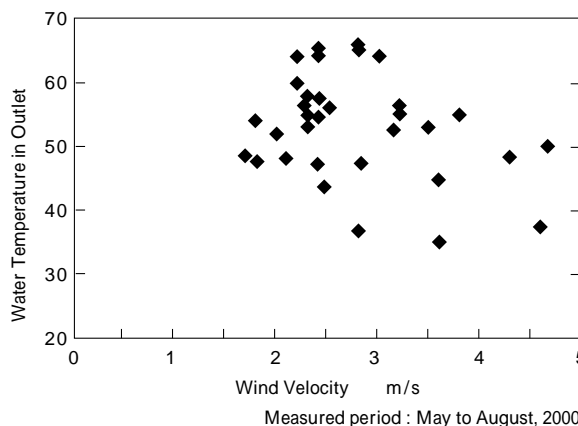


第5図 各断面構造における回収熱量(測定時期:2000年6月)
Fig. 5 Collected thermal energy in each cross-sectional structure (Measured period: June, 2000)



第6図 集熱特性概念図

Fig. 6 Conceptual figure of characteristic collected thermal energy in system



第7図 2000年5月~8月における集熱量

Fig. 7 Amount of collected thermal energy from May to August

第3表 回収熱量測定結果と日射条件

Table 3 Measurement results

Items	Measurements
Collected Thermal Energy per one Column	2 ~ 5MJ/day
Collected Thermal Energy (Calculation for a 3kW system with 7 columns)	14 ~ 35MJ/day (3344 ~ 8361kcal/day)
Average Solar Radiation Intensity in Measurement Period	564 ~ 874W/m ²
Collected Thermal Energy per Unit Area	8.1 ~ 20.2MJ/m ² ·day

単位面積あたりの回収熱量を第3表にまとめた。第3表からも、太陽電池設置面に入射した熱エネルギーをフィン効果で回収するため、熱回収装置の設置面積あたりの回収熱量が高く、省スペースでの電熱併給システムの設置が可能であることがわかる。

3. 本システムの年間熱回収性能の予測

3.1 解析モデルの構築

本システムについての解析モデルの概念図を第8図に示す。本モデルでは、伝熱管への直接的熱回収と太陽電池から伝熱管への間接的熱回収を個別に考慮しており、また夏季におこなった実験結果より算出した総括熱伝達率を使用している。また、日射強度、風速、伝熱管入口水温、外気温の環境条件から伝熱管出口での水温および熱回収量が予測可能である³⁾。

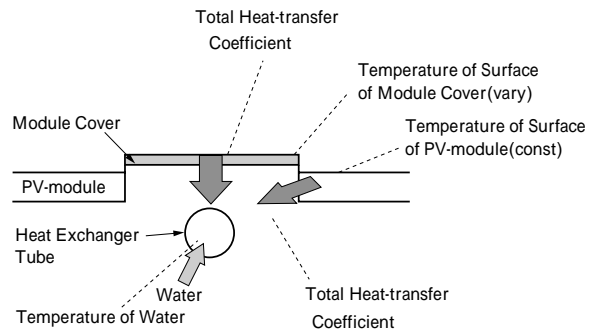
3.2 前提条件

一般住宅向け太陽光発電システムで標準的とされている3kW発電システム(型材7列)で、年間熱回収量を予測する上での前提条件を第4表に示す。本予測では、代表的な気象条件として東京における気象観測データを使用した⁴⁾。また、一般住宅の屋根に設置することを想定して、一般住宅の屋根の平均的な傾斜角度に合わせ設置角度を22°、熱回収時間を10:00～14:00までの4時間で240lの水を加熱することとした。

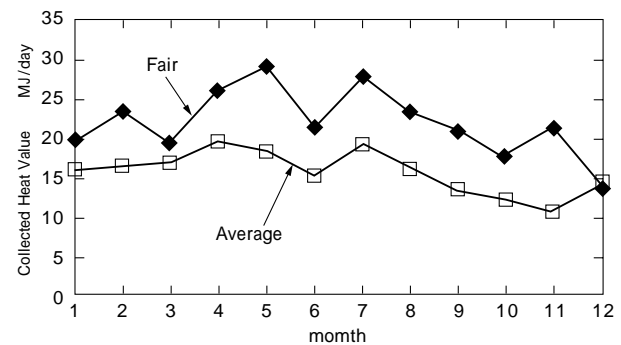
3.3 予測結果

年間熱回収量と伝熱管出口の平均水温の予測結果をそれぞれ第9図と第10図に示す。両グラフの横軸は各月であり、縦軸にはそれぞれ3kWシステムでの熱回収量と水温を示している。両グラフ中の晴天日の予測結果は、各月において日射量が最大となる日の気象条件をもちいた予測結果である。

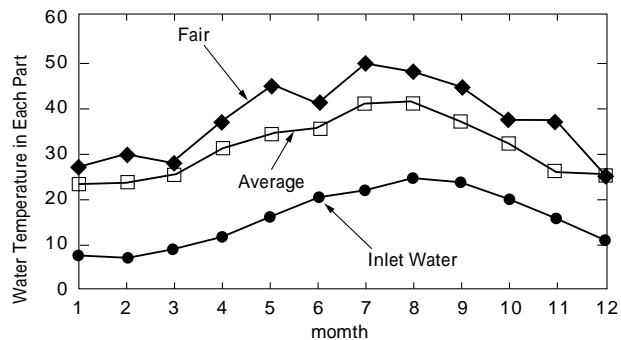
また、平均日の予測結果は、各月ごとの雨/曇りの気象条件を含む全天候での気象条件の平均値をもちいた予測結果である。これら予測結果から、本システムの目標とした熱回収量である20MJ/日の熱回収を、晴天日については通年で実現できることがわかる。また、年間を通してえられる温水の温度レベルが、冬場でも30°近くになることがわかる。



第8図 解析モデルの概念図
Fig. 8 Conceptual figure of an analysis model



第9図 年間集熱量の予測結果
Fig. 9 Prediction result of annual collected thermal energy

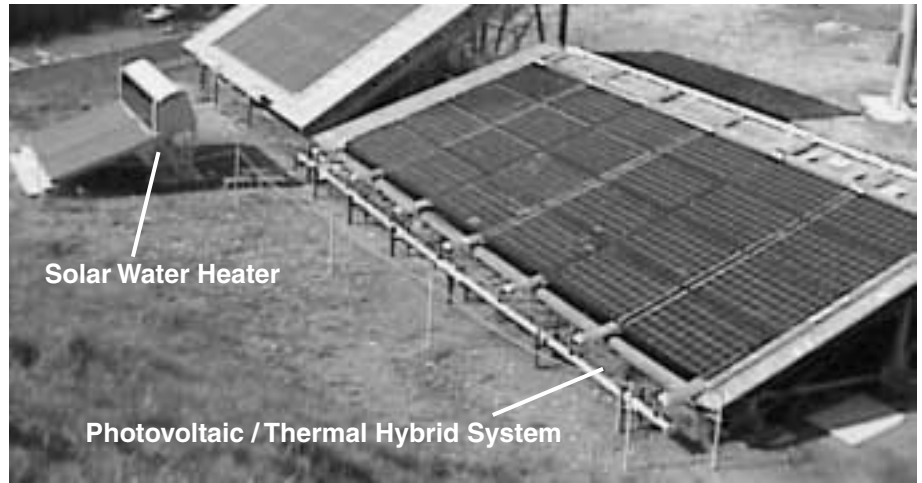


第10図 年間の平均出口水温の予測結果
Fig. 10 Prediction result of annual average exit water temperature

第4表 年間集熱量予測における前提条件
Table 4 Prediction conditions of annual amount of collected thermal energy

Items	Condition/Source
Using Data for Calculation • Meteorological Data	Solar Radiation Intensity Ambient Temperature Wind Velocity Tokyo 10:00 ~ 14:00 Annual Report of THE JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY (1996)
Place During the Period Summary Report	
• Water Temperature	Solar System Development Association
Installation Condition	
Direction	South
Tilt Angle	22°
Height from the Ground	4m
Rate of Circuration of Water Flows	0.14l/min (240l/4h)
Heat Exchanger Tubes per 1 Column of Extrusions	
Number of Tubes	2
Length	3.3m
Diameter	12.8mm (Wall Thickness : 0.7mm)
Module Cover	
Size (Width × Length)	64mm × 3.3m
Surface	Black Paint
Accumulated Solar Radiation	
On a Fair Weather Days of Each Month	7.2 ~ 13MJ/m ²
On an Average Weather Days of Each Month	1.6 ~ 2.3MJ/m ²

写真2 実験装置概観 (3kW ハイブリッドシステムと自然循環型太陽熱温水器)
 Photo 2 General view of experimental device (Photovoltaic/thermal hybrid system and natural convection type solar water heater)



4. 実証試験

4.1 実証試験装置

年間の回収熱量の予測結果を検証するために、写真2に示すように発電量 1kW の実験装置を拡張して発電量 3kW のシステムを製作した。また、同時にこれまで広く普及している自然循環型太陽熱温水器を並設し、本システムと太陽熱温水器の性能を比較した。第5表に本実験で使用した装置の構成部品を示す。

4.2 実証試験条件

本実験での各実験条件と測定項目は第6表に示すとおり

第5表 発電量 3kW 電熱併給システムの構成機器仕様

Table 5 Specification of parts of photovoltaic / thermal hybrid system with 3kW generated electricity

Items	Specification
Number of Modules	24
Rated Output of Generated power	3 kW
Circulation Heat-medium	Tap Water
Buffer Tank	Maximum 250l
Rate of Water Flows	1l/min
Heat Exchanger Tubes	
Number of Tubes	2
Length of Single Tube	3.3 m
Diameter	12.8mm (Thickness : 0.7mm)
Module Cover	
Size(Width × Length)	75mm × 3.3m
Surface	Black Paint

第6表 発電量 3kW の電熱併給システムでの実験条件と測定項目

Table 6 Experimental conditions in photovoltaic / thermal hybrid system with 3kW power generated system and measured items

Condition / Item	Our Proposed System	Solar Water Heater
Rate of Circulating Water Flow/ Tank Capacity	1.01 / min (Total for 7 Columns) (Ended the measuring at flow-rate integration 240l)	200l (Tank Capacity)
Operating Time	10:00 ~ 14:00 (4 hours/day)	Whole Day
Installation Condition		
Direction	South	
Tilt Angle	15°	
Total Installation Area	23.0m ² /3kW System	
Area of Module Cover	1.48m ²	
Site	Kobe City	
During the Period	November, 2000	
Measurement Items	Experimental Condition	
Solar Radiation Intensity	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)	
Ambient Temperature	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)	
Wind Velocity	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)	
Water Temperature	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)	
Temperature of Individual Members	10:00 ~ 14:00 (Average every other minute)	

りである。本実験では、流量を一日あたり 240l となる水量とし、カバーの幅を 64mm と小さくしている。また、測定期間が、11月の秋季である以外は、先の実験と同じ条件である。

自然循環型太陽熱温水器は、市販のタンク容量 200l のものを使用し、設置方位・設置角度が本システムと同じ日射条件となるように設置した。

4.3 実証試験結果

夏季の測定結果と前述の気象データから求めた11月の予測結果と、2000年11月における本システムと自然循環型太陽熱温水器での熱回収量の測定結果を第7表に示す。

第7表 11月における予測結果と測定結果

Table 7 Predicted results and measured results for November

	Items	Our Proposed System	Solar Water Heater
Calculation of Conditions	Installation Place Tilt Angle Direction	Tokyo 22° South	Tokyo 30° South
	Module Cover Size(Width × Length)	64mm × 3.3m	
Predicted Value and Catalog Value	Collected Thermal Energy	21.5MJ/day	28MJ/day
	Maximum Water Temperature at Hot Water in the Tank	37	50
Weather Condition (Date)	Item	Measured Result	
Fine (11/4)	Collected Thermal Energy	22.2 MJ/day	23.9 MJ/day
	Maximum Water Temperature at Tank Hot Water	42.5	48.1
Fine (11/6)	Collected Thermal Energy	20.5 MJ/day	24.9 MJ/day
	Maximum Water Temperature at Tank Hot Water	40.6	46.9
Partly Cloudy (11/7)	Collected Thermal Energy	18.6 MJ/day	21.6 MJ/day
	Maximum Water Temperature at Tank Hot Water	38.4	43.4
Partly Cloudy (11/14)	Collected Thermal Energy	14.9 MJ/day	15.5 MJ/day
	Maximum Water Temperature at Tank Hot Water	32.5	31.0
Partly Cloudy (11/19)	Collected Thermal Energy	12.7 MJ/day	17.4 MJ/day
	Maximum Water Temperature at Tank Hot Water	26.0	32.1

熱回収量の測定結果と予測結果がほぼ同じ程度となり、本システムの性能予測モデルが十分信頼できるものであることが確認された。

また、太陽熱温水器と比較して本システムでえられる温水の温度および熱回収量が冬場では若干低くなるものの、晴天日では目標としていた一日あたり 20MJ 以上の熱回収が可能であることが確認できた。

5. まとめ

本研究を通して次のことが明らかとなった。

- 1) 従来の太陽電池を屋根に固定する部材を利用して熱回収をおこなうことを特徴とする発電量 3kW の電熱併給ハイブリッドシステムによって、晴天日であれば一日あたり 20MJ 以上の熱回収をおこなえることと、水道水を約 20℃ 以上昇温できることが証明された。
- 2) 太陽電池設置面で生じる熱を回収することでシステムの設置面積に対して効率よく太陽エネルギーを利用でき、システムの省スペース化が可能である。
- 3) 本システムの熱回収性能は、市販されている自然循環型太陽熱温水器とくらべて若干低くなるものの、

浴槽の補助熱源として十分使用できるという見込みをえた。

- 4) 従来の太陽光発電システムの外観を大きく変えることなく目標の熱回収量がえられることを確認した。
- 5) 今回作成した性能予測モデルが十分信頼できること、また有効な開発ツールとなることが確認できた。

むすび = 本電熱併給システムは、省スペース、低コスト、長期信頼性などの特徴を有しており今後の普及が期待される。ただし、より普及しやすくするためには、風による熱回収性能の低下を防止する対策と、冬場における温水の温度レベルの向上が今後の課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 桑原英明ほか：太陽/風力エネルギー講演論文集(1999) p.5.
- 2) 桑原英明ほか：太陽/風力エネルギー講演論文集(1999) p.323.
- 3) 関信弘：電熱工学，(1993) p.204. 森北出版
- 4) 気象庁監修，平成8年気象庁年報，東京地区(1996) (財)気象業務支援センター